

# 발효공정에 있어서의 퍼지이론의 응용



김 석 진

<KINITI 전자전기실장>

이 대 규

<KINITI 생명과학실 책임연구원>

## 1. 序 論

발효공정에 있어서 工程의 수학적 모델구성이 곤란하며 프로세스의 特性도 不分明한 경우가 많다. 또한 菌體, 基質 및 生成物濃度 등의 Online 측정이 곤란하기 때문에 숙련기술자의 경험에 따라서 工程運轉이 이루어지는 경우가 많다. 이렇게 발효공정의 조업상 노하우가 중요한 역할을 차지하고 있고 또한 숙련기술자가 점점 부족해 지고 있는 현상 상황에 있어서 工程制御에 人間の 知識을 표현하기 쉬운 새로운 制御技術, 즉 專門家(Expert)시스템, 人工知能, 또는 퍼지制御 등이 도입되고 있다.

本稿에서는 요즘은 특히 관심을 끌고 있는 퍼지이론에 대해 간략하게 설명하고 발효공정의 응용 사례를 하나 引用함으로써 特性이 不分明한 경우에도 퍼지제어가 가능함과 동시에 醱酵工程에서도 이 퍼지이론을 적용시킬 수 있음을 설명하고자 한다.

## 2. 퍼지제어

### 2-1. 퍼지理論의 概要

퍼지이론은 미국 버클리대학의 자데(Lotfi A. Zadeh)교수가 1964년 提案한 이론이다. 이 이론은 人間の 主視的인 애매모호함을 취급하는 이론으로서 이 애매모호함을 퍼지集合(Fuzzy Set)이라는 집합으로 표현하고 있다.

예를 들어 “사과 두개를 사오라”고 했을 때에는 사과 두개만 사오면 되겠지만 “사과 두어개를 사오라”고 했을 때에는 몇개를 사와야 할 지 망설이게 된다. 이 때 사과 두개 또는 세개 사왔을 경우, 심부름시킨 사람의 만족도를 비교해 보자. 만약 심부름 시킨 사람으로서 세개를 사와도 좋겠지만 두개를 사오면 더 좋겠다고 할 때 “두어개”란 말은

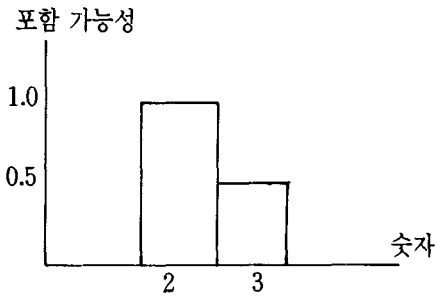
### 目 次

1. 서 론
2. 퍼지제어
  - 2-1. 퍼지이론의 개요
  - 2-2. 퍼지집합의 연산
  - 2-3. 퍼지제어기
  - 2-4. 퍼지제어기의 설계
3. 퍼지제어의 발효공정에의 응용
  - 3-1. 배양의 최적조건
  - 3-2. 유기제어규칙의 설계
4. 결 론

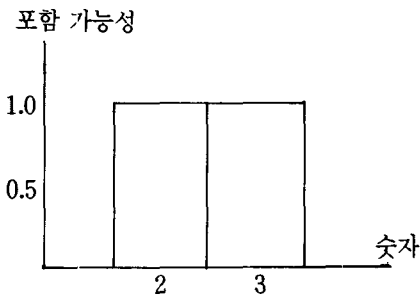
“둘 또는 세개이지만 두개를 강조한 말”이 된다.

이것을 좀 더 數學的으로 나타내게 되면 “둘일 가능성이 1.0, 셋일 가능성이 0.5”라고 정의할 수 있게 되고 “두어개”라는 集合에 들은 1.0, 셋은 0.5의 가능성을 포함하고 있다고 할 수 있겠다. 이러한 것을 퍼지集合이라고 하며 이는 名元素가 集合에 포함될 가능성을 붙여 다음과 같이 표시할 수 있다. 이 관계를 <圖 2-1>에 나타내었다.

$$\text{“두어개”} = \{(2, 1.0), (3, 0.5)\}$$



<圖 2-1> 퍼지집합  $\{(2, 1.0), (3, 0.5)\}$

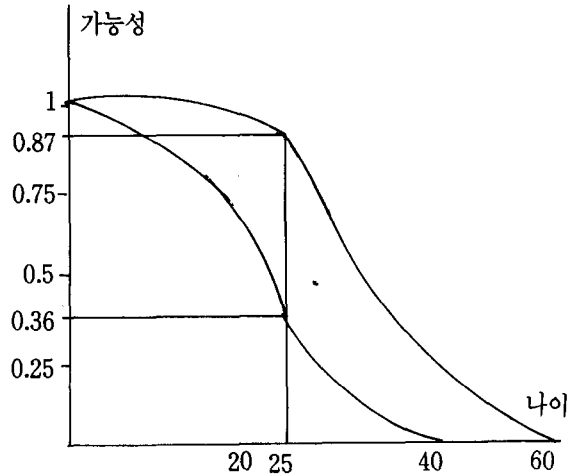


<圖 2-2> 일반집합 {2, 3}

반면 一般集合의 경우 名元素가 포함될 가능성이 1.0이기 때문에 <圖 2-2>와 같은 관계를 가지게 되며 이러한 점이 퍼지集合과 一般集合의 다른 점이 되겠다.

퍼지이론에서는 不確實한 상황을 표시할 때 숫자 보다는 自然語의 口文式 표현(Linguistic Expression)을 사용하는 경우가 많다. 예를 들어 “철수는 젊다”라고 했을 때 이 口文式 표현에는 “젊다”라는 애매한 상태가 포함되어 있다. 이럴 때 <圖 2-

3>과 같이 젊다는 의미를 미리 定義해 두면 “젊은 나이”들을 集合으로 표현할 수 있게 되며 이러한 集合도 역시 퍼지集合이 될 수 있다.



<圖 2-3> “젊다”와 “매우 젊다”는 의미를 정의하는 퍼지집합

그림에서 가로축은 나이를 나타내고 세로축은 所屬函數值(Membership Function Value)를 나타낸다. 또한 曲線은 퍼지집합에 포함될 가능성인 所屬函數를 나타내고 있다. 그림과 같이 정의해 놓은 “젊다”라는 의미대로 한다면 10세인 사람은 당연히 젊다고 할 수 있겠으므로 포함 가능성은 1.0이 된다.

그러나 口文式 표현을 바꾸어 “철수는 매우 젊다”라고 했을 때 소속함수는 <圖 2-3>의 왼쪽으로 이동된 曲線으로 나타나게 된다. 이 때 40세 이하의 사람만이 “매우 젊다”의 퍼지집합에 포함될 수 있으며 25세되는 사람의 포함 가능성은 0.36으로 바뀌게 된다.

## 2-2. 퍼지集合의 演算

이렇게 애매한 표현으로 나타낸 숫자값이라고 하더라도 퍼지計算方式에 따라 퍼지연산이 가능하다.

예를 들어 “두어+두어”의 값을 구해 보자. 이 때의 수는 4, 5, 6이 될 수 있는데 각 숫자가 수에 포함될 가능성을 보게 되면 다음과 같다.

4는 2+2에 의해 얻어지게 되나 2가 “두어”에 포함될 가능성은 1.0이다. 따라서 2+2가 수에 포함될 가능성도 1.0이라고 할 수 있으므로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$(2, 1.0) + (2, 1.0) = (4, 1.0)$$

5는 2+3 또는 3+2에 의해 얻어지게 되나 다음과 같이 2와 3의 가능성은 0.5 또는 1.0이기 때문에 이 때 5가 포함될 가능성은 最小값을 택하여 0.5로 한다.

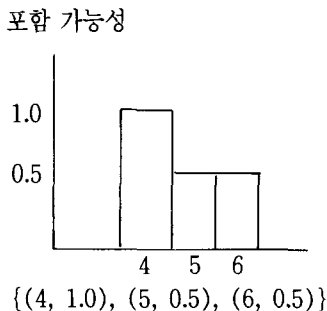
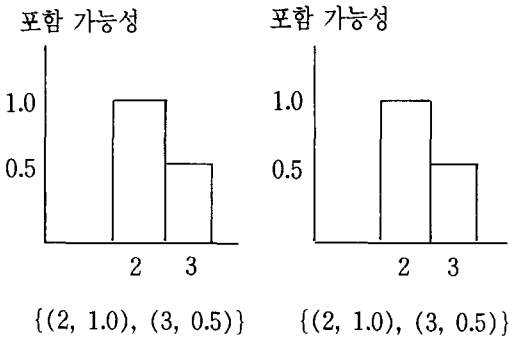
$$(2, 1.0) + (3, 0.5) = (5, 0.5)$$

$$(3, 0.5) + (2, 1.0) = (5, 0.5)$$

마찬가지로 6이 될 가능성도 다음과 같이 된다.

$$(3, 0.5) + (3, 0.5) = (6, 0.5)$$

이러한 퍼지집합의 덧셈관계를 <圖 2-4>에 나타내었다.



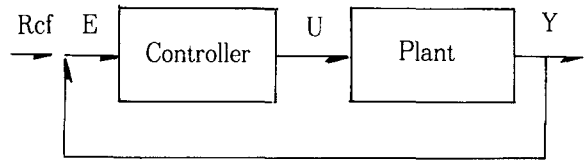
<圖 2-4> 퍼지덧셈 ‘두어’+‘두어’

퍼지이론에서는 이와 같이 加減乘除 등 다양한 계산방법이 가능하기 때문에 우리가 애매모호하게 알 수 있는 사실을 애매한 상태 그대로 입력하여 원하는 결과를 얻을 수 있게 된다.

### 2-3. 퍼지制御器

일반적으로 퍼지제어기는 시스템特性이 복잡하여 기존의 定量的인 방법으로는 해석할 수 없거나 얻어지는 정보가 定性的이고 不正確하며 不確定한 경우에 적용시키면 기존 제어기보다 우수한 제어결과를 얻을 수 있게 된다.

퍼지제어기를 설명하기 위해 <圖 2-5>와 같은 一般制御系를 생각해 보자.



<圖 2-5> 제어 시스템의 일반적인 형태

여기서 제어기(Controller)의 역할은 誤差(E)를 입력받아서 制御入力(U)를 계산하는 것이다. 기존 제어에 있어서는 제어기로의 入出力이 모두 확실한 값으로 주어지게 돼있고 制御規則을 言語的으로 표현하게 되면 다음과 같이 될 것이다.

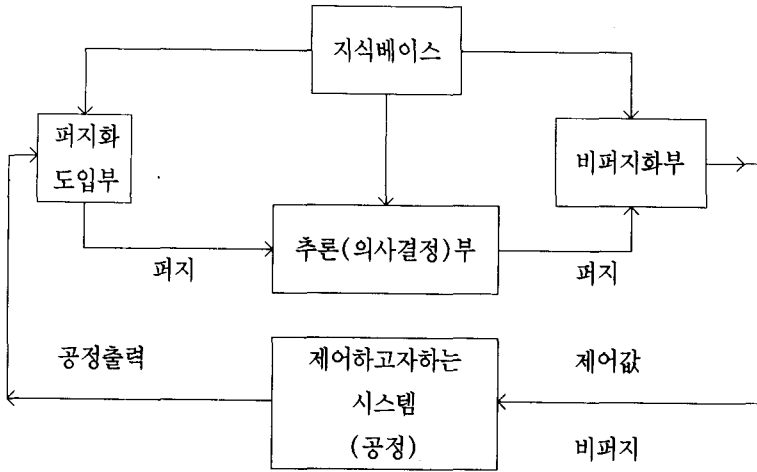
$$\text{if } E=0.8 \text{ and } CE=0.2 \text{ then } U=0.9$$

여기서 CE는 오차의 變化分을 뜻한다. 그러나 퍼지제어기에서는 입력과 출력이 모두 애매모호한 퍼지값으로 주어지게 된다. 예를 들면

$$\text{if } E=PB \text{ and } CE=PE \text{ then } U=PB$$

여기서 PB,PS 등은 각각 自然語로서 “약간 크다 (Positive Big)”, 약간 적다(Positive Small)”을 나타내는 퍼지집합이 된다.

일반제어기에 있어서 제어입력의 계산은 演繹推論(Modus Ponens)方式이 그대로 적용된다. 즉 A



<圖 2-6> 퍼지 논리제어기의 기본 구성

→B라는 관계가 주어지고 變數A가 주어지게 되면 B가 類推되게 된다. 그러나 이러한 類推關係는 變數 A에 대매한 값이 주어졌을 때 적용할 수 없게 된다. 따라서 퍼지제어기에서는 演繹推論을 퍼지論理로 확장시킨 一般演繹推論(Generalised Modus Ponens)를 이용하게 된다. 즉 A→B라는 관계가 주어지고 애매한 A의 퍼지입력값 A'가 주어지게 되면 B의 類推된 퍼지출력 B'가 나오게 된다.

애매한 오차입력으로부터 위와 같은 출력을 얻어 내는 퍼지제어기는 일반적으로 <圖 2-6>과 같이 구성되어 있으며 각 부분의 기능은 다음과 같다.

- 1) 퍼지화 導入部(Fuzzification Interface)
  - 제어기 입력값의 측정
  - 입력 변수값의 領域(Region)을 이에 상응하는 全體集合(Universe of Disclosure)으로 크기변환(Scale Mapping)
  - 입력값의 퍼지화 수행. 즉 입력데이터를 적절한 言語的인 값으로 변환시킨다.

2) 知識베이스(Knowledge Base) - 데이터 베이스와 퍼지제어 規則部로 구성

- 데이터 베이스는 퍼지논리 제어에서의 퍼지 데이터를 조작하고 言語的 제어규칙을 定義

하는 데 필요한 사항들을 定義

- 퍼지제어 규칙부는 제어목적과 이 방면 전문가의 제어방침을 言語的 制御規則들로 나타낸다.

3) 推論(意事決定)部(Decision-making Logic)

- 퍼지관계와 퍼지논리의 推論規則을 도입하여 퍼지제어입력을 구함.

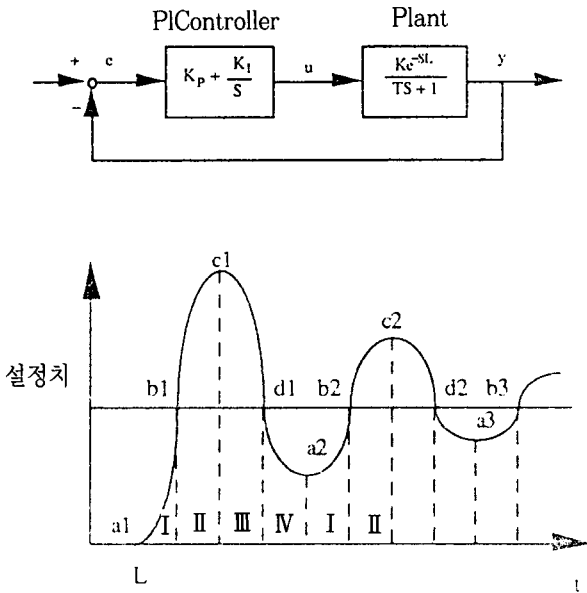
4) 非퍼지化部(Defuzzification Interface)

- 출력퍼지값을 실제 제어입력의 全體集合에 맞추어 크기변환시킨다.
- 출력의 非퍼지화를 수행한다. 즉 계산된 퍼지값은 실제 제어입력으로 사용할 수 없기 때문에 이를 明確한 퍼지값으로 변환시킨다.

## 2-4. 퍼지制御器의 設計

퍼지제어기 설계의 一例로서 <圖 2-7>과 같은 應答特性的 퍼지제어기 설계과정을 살펴보기로 하자. 이 시스템은 時間定數(Time Constant) t와 時間遲延(Time Lag) L을 갖는 一次遲延系 플랜트에 比例積分(PI) 제어가 포함된 형태이다.

제어규칙은 條件附 變數로서 출력오차 E, 샘플링



<圖 2-7> 제어 대상 플랜트의 응답 특성

기간 동안의 E 변화분  $\Delta E$ , 그리고 결론부의 변수로서 操作量 U의 변화분  $\Delta U$ 를 사용하기로 할 때 퍼지제어기의 입출력 관계는 다음과 같이 된다.

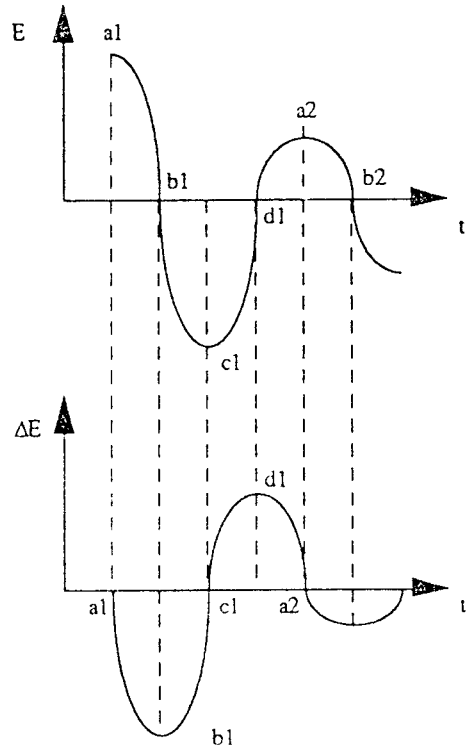
$$(E, \Delta E) \rightarrow \Delta U$$

이와 같이 E와  $\Delta E$ 로부터  $\Delta U$ 를 구하는 구조를 퍼지 PI제어라고 한다.

설계를 돕기 위해 <圖 2-7>의 應答特性을 시간軸에 따라 각각 E와  $\Delta E$ 의 變化率인 <圖 2-8>의 曲線으로 나타내게 되면 制御規則은 다음과 같은 순서로 정할 수 있다.

- 예상된 應答曲線을 몇개의 特性構間으로 나눈다.
- 각 구간에 있어서 應答특성을 잘 나타내는 特徵點을 선별한다.
- 각 特徵點들을 가장 잘 나타내는 입력부 變數의 퍼지값을 결정하고 필요한 제어동작을 정해서 퍼지變數를 定義한다.

예를 들면 1 사이클상태 I의  $a_1$  부근에서는 오차가 陽으로 되고 플랜트 출력은 거의 없으므로  $\Delta E$ 는 0에 가깝게 된다. 그리고 이 부근에서는 당연히



<圖 2-8> E와  $\Delta E$ 의 應答특성

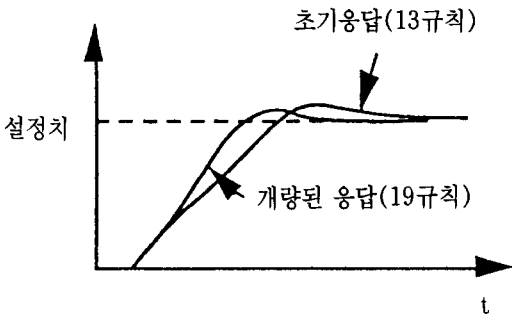
조작량을 가장 크게 해야하므로  $U=PB$ 로 증가시킨다. 이 사항들은 퍼지집합으로 기술하면  $E=NB$  and  $E=Z\phi$ 와 같이 표현할 수 있으며 이와 같은 방식을 계속하게 되면 다음과 같은 制御規則을 얻을 수 있게 된다.

- $a_1$  : if  $E=PB$  and  $\Delta E=Z\phi$  then  $\Delta U=PB$
- $b_1$  : if  $E=Z\phi$  and  $\Delta E=NB$  then  $\Delta U=NB$
- $c_1$  : if  $E=NB$  and  $\Delta E=Z\phi$  then  $\Delta U=NB$
- $d_1$  : if  $E=Z\phi$  and  $\Delta E=Z\phi$  then  $\Delta U=PB$

여기서 PB : Positive Big, PM : Positive Medium, PS : Positive Small,  $Z\phi$  : Positive Zero, NS : Negative Small, NM : Negative Medium, NB : Negative Big을 각각 뜻한다.

2 사이클째의 경우,  $a_2, b_2$  근처에서는  $a_1, b_1$ 에 비해 E 혹은  $\Delta E$ 의 절대치가 작게되어 있으므로 U의 값도 상대적으로 작게 되도록 다음과 같은 制





<圖 2-10> 개량된 제어규칙과 제어성능

### 3. 퍼지제어의 발효공정에의 응용

#### 3-1. 培養의 最適條件

빵효모(*Saccharomyces cerevisiae*)를 高濃度糖培地에서 回分培養하게 되면 효모는 우선 알코올 발효에 의해 증식되고 糖의 消失後 생성된 에탄올을 資化增殖하는 2단계 공정에 의해 생산성이 저하되게 된다. 그러므로 工業적으로는 배양액중의 糖消失速度에 따라 培地를 逐次追加시켜 배양시키는 基質流加培養法을 실시하고 있다. 이 경우 呼吸狀況에 의한 배양상태의 同定(Identification)과 排氣中 알코올 농도의 측정 등 배양의 자동화가 이루어지고 있다. 이 과정에서 빵효모의 流加培養에 있어서 생산속도를 향상시키고 에탄올이 적게 발생되도록 퍼지제어를 적용해 보기로 하였다.

流加培養法은 回分培養法과 連續培養法의 특징을 잘 배합시킨 방법으로서 배양조건의 검토를 위해 單槽連續培養을 하였다. 각 稀釋率 D의 정상상태에 있어서 생산속도(稀釋率 × 菌體濃度)와 對基質

收率의 관계는 <圖 3-1>과 같다. 그림에서  $D = 0.1(h-1)$  부근에서 收率이 가장 높고 생산속도의 최대점은  $D = 0.24(h-1)$ 이 되었으나 부산물로서의 알코올 生産收率은 낮아지게 된다.

빵 효모배양의 最適化는 두개의 서로 다른 目的函數를 만족시키는 多目的計劃化方法이다. 따라서 어느 目的函數를 개선시키기 위해서는 다른 목적함수를 어느 정도 희생시켜야 한다. <圖 3-1>의 上半部 實線部分은 非劣集合이라고 부르며 이 領域中에서 경제적 요인이나 제약조건 등을 고려해서 最適條件을 결정하여야 한다. 이 실험에서는 생산속도를 重視하고 에탄올이 적게 생산되도록 하는 조건을 채택하였다.

배양조건이 정상이라면 효모는 指數函數의으로 증식되고 糖의 소비속도도 여기에 비례하기 때문에 培地供給을 Feed Forward的으로 제어할 수가 있다. 1 샘플링시간( $\Delta t$ )후의 流加速度  $F(t)$ 는 다음과 같은 逐次式으로 표현할 수 있다.

$$F(t) = F(t - \Delta t) \{ \exp(\mu, \Delta t) \}^u$$

여기서  $\mu$ 는 比增殖速度,  $u$ 는 Feedback 제어에 있어서의 操作係數이다. 배양상태가 定常이고  $u = 1$ 이면  $F$ 는 指數函數的으로 증가하게 되며  $u < 1$ 이면  $F$ 는  $u-1$  段階前 상태까지 감소되며  $u > 1$ 인 경우  $F$ 는  $u$ 段階分만큼 증가하게 된다.  $F$ 의 初速度는 菌體濃度, 比增殖速度, 收率, 및 流加培地 糖濃度로부터 推算된다.

#### 3-2. 流加制御規則의 設計

氣相中の 에탄올 농도와 培地中の 糖濃度와의 관계는 분명하지 않으나 일반적으로 빵효모의 工業적 배양에 있어서 “알코올이 생성되면 培地供給을 감소시킨다.”, “배양이 定常이면 菌體量에 따라 培地供給을 증가시킨다.”라는 經驗法則에 따라 培地供給速度를 제어하여 생산성을 높이고 있다.

에탄올 농도와 設定値와의 편차를  $E$ 로 하고 이

<表 3-1> 制御規則表(3×3)

		에탄올 濃度 偏差 值 (E)		
		NB	ZO	BE
變化量 (E)	PB	(領域4)	NB	(領域1)
	ZO	PB	ZO	NB
	ZB	(領域3)	PB	(領域2)

를  $Z\phi$ , PB, NB의 세개 퍼지變數로 分割시킨 후 각각의 三角形 所屬函數를 經驗的으로 정한다. 제어규칙중의 操作量도 같은 방법으로 세개의 퍼지變數로 分割시킨다. 여기서  $Z\phi$ 는 배양이 정상상태인 것을 의미한다.

이들의 경험법칙은 다음과 같이 제어규칙으로 표현할 수 있다.

R1 : if E=PB then U=NB

R2 : if E= $z\phi$  then U= $Z\phi$

R3 : if E=NB then U=PB

여기서 U는 操作變數를 나타낸다.

이러한 기본적인 제어법칙에 PI제어를 수행하기 위해  $\Delta t$  시간후의 E變化量( $\Delta E$ )를 도입시키면 다음과 같은 5개의 제어법칙이 성립된다.

R1 : if E= $Z\phi$  and  $\Delta E$ =PB then U=NB

R2 : if E=PB and  $\Delta E$ = $Z\phi$  then U=NB

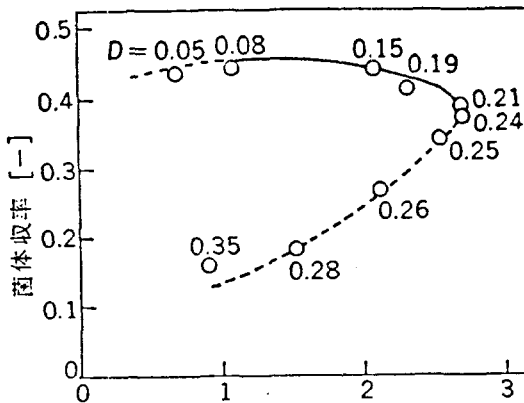
R3 : if E= $Z\phi$  and  $\Delta E$ =NB then U=PB

R4 : if E=NB and  $\Delta E$ = $Z\phi$  then U=PB

R5 : if E= $Z\phi$  and  $\Delta E$ = $Z\phi$  then U= $Z\phi$

이는 <表 3-1>과 같이 2차원의 퍼지제어법칙으로 표시할 수 있다.

이 프로세스가 減衰振動을 한다고 생각하면 R1은 에탄올 농도가 설정치를 正의 방향으로 이루어 지도록하는 제어규칙, R2는 極大点에서의 제어규



<圖 3-1> 빵 酵母의 單槽連續培養에 있어서 生産性

칙을 나타내게 되며 R5는 定常狀態에서의 제어규칙이 된다. 여기서는 制御應答이 領域 1, 2, 3, 4를 통과하고 時計方向의 나선형을 이루면서 定常點을 향하도록 制御表를 작성하였다.

이렇게 5개의 제어규칙을 갖고 실험한 餱효모의 試驗流加培養 결과 에탄올 농도는 크게 振動하거나 發散하지 않았으며 培地의 공급속도는 指數函數的으로 증가하면서 安定狀態를 유지하였다.

다른 한편으로 에탄올 편차 및 변화량을 각각 7개 構間으로 분할시키고 PB,  $Z\phi$  및 NB의 퍼지變數에 PS, PM, NS 및 NM을 새로이 추가시켜  $7 \times 7 = 49$ 개의 제어규칙을 만들고 각 領域의 空欄을 工程狀態가 중심부를 향해 集束되도록 逐次決定해 보았다. 2개의 상태량에 대해 결정된 操作量을 이해하기 쉽도록 하기 위해 퍼지變數를 直接制御값(U)으로 置換시킨 것이 <表 3-2>의 제어규칙 표이다.

<表 3-2> 制御規則表(E,  $\Delta E$  vs. U)

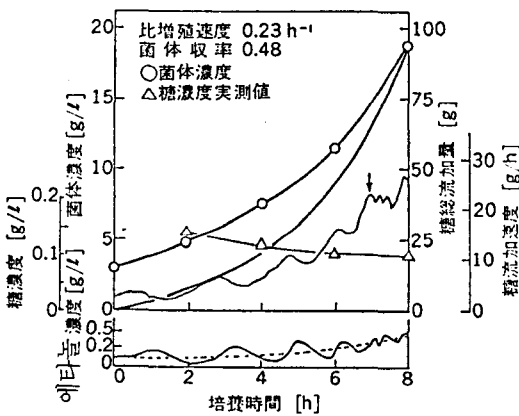
		에탄올 偏差值 (E)						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
에 타 놀 變 化 量 ( $\Delta E$ )	PB	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
	PM	2	1	0	-1	-2	-3	-4
	PS	3	2	1	0	-1	-2	-3
	ZO	3	2	1	1	0	-1	-3
	NS	4	3	2	2	1	0	-2
	NM	5	4	3	3	2	1	1
	NB	5	5	3	3	2	1	1

미생물의 배양에서는 菌體量이 시간과 더불어 증대하기 때문에 에탄올 설정치를 豫測菌體濃度의 2%로 하고 배양경과에 따라 점차 증대시킨 결과 餱효모의 流加制御培養 결과는 <圖 3-2>와 같이 되었다.

이 실험에 의하면 에탄올 농도의 制御性은 아주 양호하다고는 할 수 없으나 培地流加速度는 전체적



으로指數函數로 증가하고 있음을 알 수 있다. 용존酸素(DO) 농도가培養律速이 된 후에도培地의流加速度는 잘 제어되고 있으며糖濃度도 0.1 g/l 이하로 유지되고 있으므로 이 방법이 용存酵素 및糖濃도에 대하여 유효한制御法이라는 것을 알 수 있다. 또한制御表를 개선시켜 배양한 결과 에탄올 농도 제어특성이 향상되었고培地流加도指數函數的으로 상승하였으며 양쪽 모두에서比增速度  $\mu=0.24/h$ , 増殖收率 0.5라는 좋은 결과를 얻을 수 있었다.



에탄올은 가스센서 出力值, 点線은 同設定值, ↓는 酸素律速 時点이 된다.

<圖 3-2> 퍼지 제어에 의한 빵 酵母培養經過圖

## 4. 結 論

本稿에서는 퍼지이론 및 퍼지제어기의 개념에 대해 간단히 소개하고 醱酵工程에 응용된 事例를 하나 들어 설명하였다.

물론 이 퍼지이론도 여타 제어이론과 마찬가지로 복잡한 數式이 필요하며 다양한 퍼지제어규칙의 設計方法, 安定度 解析, 所屬函數의 設定方法, 파라미터의 最適化方法 등 해결되어야 할 연구분야가 아

직도 많이 남아 있다. 그러나 복잡한 제어대상이나 특성이 변동하는 系統에 있어서는 수학적 모델에 크게 의존하지 않고 제어대상의 入出力 變數의 定性的 關係만으로 제어할 수 있는 퍼지제어가 효과적이다. 특히 공정의 특성이 不分明하고 經驗에 많이 의존해야하는 醱酵工程의 운전에 있어서 이 퍼지제어의 응용분야는 많이 있으리라 사료된다.

### <參考文獻>

1. 퍼지이론 및 응용,  
이광형, 오길록 공저, 흥능서적출판사
2. Fuzzy Bioengineering Models,  
Biotechnol & Bioeng., Vol. 17, 1146-1151 (1985)
3. Development of on-line sensing and computer aided control system for sake brewing,  
J.Biotechnol., Vol. 24, 53-74(1992)
4. Application of the Fuzzy theory to simulation of Batch Fermentation,  
J. Ferment. Technol., Vol. 63, 545-553 (1985)
5. Applying Fuzzy mathematics to product development and comparison,  
Food, Technol., Vol. 45, 110-115(1991)
6. 빵 酵母生産에 있어서 퍼지제어이론의 응용,  
化學工業, Vol. 53, 207-209(1989)
7. 구루타민산 발효프로세스에 퍼지이론의 적용  
計裝, Vol. 31(7), 22-25(1988)
8. Fuzzy reasoning system for fault diagnosis of physiological activities in a cultivating process,  
J. Biotechnol., Vol. 24, 75-83(1992)